

Влияние конфигурации радиолокационной бистатической системы на ее разрешающую способность

С. Г. Лиханский, С. Б. Алексеев, А. М. Тарасенко*

АО «Концерн «Вега», Москва, Россия

tatonika@inbox.ru

Аннотация. Представлены результаты имитационного моделирования, иллюстрирующие влияние законов движения самолетов-носителей РСА (активного и пассивного) относительно исследуемого участка поверхности Земли на разрешающую способность результирующей бистатической радиолокационной системы. Изложены методы расчета вторичных информационных массивов для синтеза изображения, включая семейство опорных функций, на основе первичной навигационной информации, представлены как формулы, так и результаты моделирования. Выявлены специфические черты бистатических обзоров общей конфигурации по сравнению с моностатическими. Проиллюстрирована процедура синтеза применительно к самолетной бистатике.

Ключевые слова. Преобразование Фурье, преобразование Лежандра, прямая свертка, бинарный ряд, бистатический обзор, радиолокатор с синтезированной апертурой, опорная функция.

Influence of Bistatic Radar System Configuration on its Resolution

Sergey G. Likhansky, Sanal B. Alekseev, Anna M. Tarasenko

Joint-Stock Corporation "Vega", Moscow, Russia

tatonika@inbox.ru

Abstract. The results of simulation modeling, which illustrate the influence of the laws of the carrier aircraft motion (active and passive) relating to investigated part of the Earth's surface on the resulting bistatic radar system resolution, are presented in this article. Calculating methods of secondary information arrays for image synthesis, including assemblage support function, based on primary navigation information, are presented both as formulas and as simulation results. Specific features of the general configuration bistatic looks are revealed in comparison with monostatic ones. The procedure of synthesis in the context of the aircraft bistatic is presented.

Keywords. Fourier transform, Legendre transform, Taylor series, direct convolution, binary series, bistatic look, synthetic aperture radar, reference function.

Введение

Большинство ранних моделей [1–4] синтеза радиолокационных изображений (РЛИ) разработано для бокового (слабо-скошенного) моностатического обзора, координат «дальность» и «азимут» (путь), разрешения ~ 5 м, ЛЧМ-структуры радиоимпульса (Chirp-Scaling-Algorithm (CSA), SPECAN).

Рост популярности бистатической обработки и повышение требований к дешифрируемости РЛИ привели к необходимости получения изображений дециметрового разрешения при сложном относительном движении носителей с активным и пассивным РСА (синтез «с подсветкой»).

Сказанное инициировало поиск более точных (и быстрых) алгоритмов [5, 6], основанных на редукции оператора синтеза РЛИ очень точным (и очень медленным) алгоритмом Back Projection к оператору двумерного преобразования Фурье заменой переменных в частотной области, которая максимально обобщает преобразование Столта [2] и дает изображение сразу в горизонтальных координатах сцены. Указанная редукция дополнена итерационной процедурой до-фокусировки [5, 6].

В статье рассмотрена априорная обработка, предваряющая синтез. Она состоит в вычислении интервала синтеза, частоты повторения, кратности когерентного накопления [4] голограммы и массивов, определяющих опорные функции синтеза — по данным навигации и требуемому разрешению.

Первая цель статьи — исследование специфики бистатических обзоров по сравнению с моностатическими обзорами (эта специфика проявляется уже на стадии априорной обработки).

Вторая цель статьи — демонстрация работоспособности алгоритма синтеза [6] в самолетных бистатических обзорах с подсветкой сцены лучом активного РСА-1, формирование голограммы в пассивном РСА-2 с конфигурацией повышенной общности геометрии обзора и движения носителей.

Исследование влияния геометрии обзора на разрешающую способность радиолокационной системы

Пусть мгновенные трехмерные векторы координат, скорости носителей РСА-1 и РСА-2 и их модули есть $\vec{X}^{(k)}, \vec{V}^{(k)}; X^{(k)}, V^{(k)}; k = 1, 2$, система координат (СК) $\vec{y} \equiv (X, Y, H)$ евклидова и имеет начало на поверхности Земли, совпадающее с текущим центром сцены, и носители (самолеты) летят на постоянных высотах с постоянными векторами скорости (с любым углом между ними).

Тогда озаглавленная задача решается априорным оцениванием следующих величин:

1. Интервал максимального горизонтального разрешения (м) в центре сцены через градиент ∇R дальности {PCA-1– $\bar{0}$ –PCA-2} по горизонтальным координатам $\bar{y} \equiv (X, Y)$:

$$\begin{aligned} \delta_{\min} &= c / B \cdot |\nabla R|^{-1} \equiv c / B \cdot (r_1^2 + r_2^2)^{-1/2} \equiv \\ &\equiv c / B \cdot \left((X_1^{(1)} / X^{(1)})^2 + (X_2^{(2)} / X^{(2)})^2 \right)^{-1/2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где f — несущая частота, B — ширина полосы частот рабочего диапазона, c — скорость света.

2. Временной интервал (с) синтеза, реализующего разрешение (1) в центре сцены через градиент $\nabla \delta f$ частоты Доплера по координатам $\bar{y} \equiv (X, Y)$ и угол ϑ между градиентами $\nabla \delta f, \nabla R$:

$$T_0 \approx \delta_{\min}^{-1} \cdot |\nabla \delta f|^{-1} \cdot |\sin \vartheta|^{-1} \equiv \delta_{\min}^{-1} \cdot (f_1^2 + f_2^2)^{-1/2} \cdot |\sin \vartheta|^{-1}, \quad (2)$$

где $f_k \equiv f / c \cdot \left(\begin{aligned} &V_k^{(1)} / X^{(1)} + V_k^{(2)} / X^{(2)} - X_k^{(1)} \cdot (\bar{X}^{(1)}, \bar{V}^{(1)}) / (X^{(1)})^3 - \\ &- X_k^{(2)} \cdot (\bar{X}^{(2)}, \bar{V}^{(2)}) / (X^{(2)})^3 \end{aligned} \right).$

3. Графическое иллюстрирование зависимости разрешающей способности бистатической пары от положения цели на поверхности Земли для конфигурации бистатического обзора общего вида.

Траектории носителей: PCA-1 — желтая и PCA-2 — голубая, текущие положения — красная и синяя точки.

Угол между траекториями 90° , скорости носителей 280 м/с, их высоты 3,5 и 4,5 км; сдвиг от начального положения 5 с.

На рис. 1, а показаны линии одинаковой дальности по лучу (белые) и линии одинакового сдвига Доплера по лучу (цветные — цвета отражают величину сдвига частоты). Диапазон — S . На рис. 1, б и в показана яркостью величина, обратная интервалу разрешения ($d_{\min} \approx 35$ см) и синтеза ($T_{0, \min} \approx 4,8$ с) соответственно.

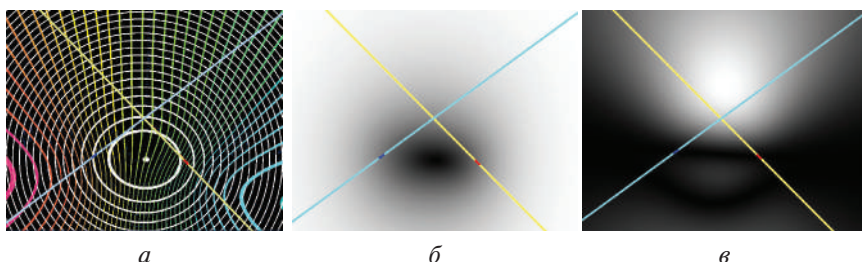


Рис. 1. Зависимость разрешающей способности от положения цели
Fig. 1. The dependence between spatial resolution and position of target

Вычисление данных для синтеза по данным навигации и требуемому разрешению

Пусть закон движения носителей, центр освещенной лучом РСА-1 сцены и СК обзора (с началом в центре сцены) фиксированы, первичные априорные оценки (формулы (1), (2)) получены.

Тогда озаглавленная задача решается следующей последовательностью этапов.

1. Компенсируем полную линейную часть закона миграции для центра сцены и момента $t = 0$:

$$R(\bar{y}; t) = R(\bar{y}; t) - \sum_{k=1}^2 (\bar{X}^{(k)}, \bar{V}^{(k)}) / X^{(k)} \cdot t - R(\bar{0}, 0) \equiv R(\bar{y}; t) - V_{\text{rad},0} \cdot t - R_0, \quad (3)$$

где $R(\bar{y}; t) \equiv \sum_{k=1}^2 |\bar{X}^{(k)} - \bar{y} + \bar{V}^{(k)} \cdot t|$ — исходный закон миграции, $V_{\text{rad},0}$ — относительная радиальная скорость сближения-удаления РСА-1 и РСА-2 по лучу {РСА-1— $\bar{0}$ —РСА-2} в момент $t = 0$.

Отвечающая редуцированному закону (3) центрированная радиальная скорость имеет вид:

$$v_{\text{rad}}(\bar{y}; t) = \sum_{k=1}^2 (\bar{X}^{(k)} - \bar{y} + \bar{V}^{(k)} \cdot t, \bar{V}^{(k)}) / |\bar{X}^{(k)} - \bar{y} + \bar{V}^{(k)} \cdot t| - \sum_{k=1}^2 (\bar{X}^{(k)}, \bar{V}^{(k)}) / X^{(k)}. \quad (4)$$

2. Получим формулы обратного геокодирования (IG — Inverse Geo-coding), отображающие каждую точку $\bar{y} \equiv (X, Y)$ сцены в стационарную точку $\bar{x} \equiv IG(\bar{y}) \equiv (t(\bar{y}), R(t(\bar{y})))^T$ время-дальность отвечающего \bar{y} закона миграции (3), то есть время-дальность в момент $t = t(\bar{y})$ обнуления радиальной скорости. (При сверточном синтезе отклик на цель в точке \bar{y} возникает в точке $\bar{x} = IG(\bar{y})$.)

Вычислим (методом Ньютона) время обнуления функции (4) для каждой точки сцены из «5-набора» $\{\bar{y}_1 \equiv (\varepsilon \ 0), \ \{\bar{y}_2 \equiv (0 \ \varepsilon), \ \{\bar{y}_{11} \equiv (E \ 0), \ \bar{y}_{22} \equiv (0 \ E), \ \bar{y}_{12} \equiv (E \ E), \ \varepsilon, E \text{ (м)} \sim 10^{-6} \text{ и } \sim 10^{-3} \text{ от раз-}$ мера сцены. По полученным временам $\{t_k; t_{mn}\}$ и дальностям $\{R_k; R_{mn}\}$ ($1 \leq k, m, n \leq 2$), которые отвечают временам согласно (3), восстановим закон IG во втором порядке точности

$$\bar{x} \equiv (t, R)^T : \approx X \cdot \bar{\mu}_1 + Y \cdot \bar{\mu}_2 + X^2 \cdot \bar{\mu}_{11} + XY \cdot \bar{\mu}_{12} + Y^2 \cdot \bar{\mu}_{22} \equiv \bar{M} \cdot \bar{y} + O(y^2), \quad (5)$$

оценивая векторы-коэффициенты через IG-образ «5-набора» (см. выше) в три шага (как описано):

- а) $\bar{\mu}_k \approx \bar{x}_k / \varepsilon$;
- б) $\bar{\mu}_{kk} \approx \bar{x}_{kk} / E^2 - \bar{\mu}_k / E \ (k = 1, 2)$;
- в) $\bar{\mu}_{12} \approx \bar{x}_{12} / E^2 - (\bar{\mu}_1 + \bar{\mu}_2) / E - (\bar{\mu}_{11} + \bar{\mu}_{22})$.

3. Оценим путевое разрешение δ_x (м) по заданному горизонтальному разрешению $\delta \geq \delta_{\min}$.

Сечение-круг $\bar{y}^T \bar{y} \leq \delta^2 \Leftrightarrow X^2 + Y^2 \leq \delta^2$ отклика разрешения δ из координат сцены отобразим линейной частью (5) $\bar{x} := \bar{M} \cdot \bar{y}$ в область время-дальность: $\bar{y}^T \bar{y} \leq \delta^2 \Leftrightarrow \bar{x}^T \bar{M}^{-1, T} \bar{M}^{-1} \bar{x} \leq \delta^2$, а затем, переходя от времени к пути PCA-2 $L \equiv t \cdot V_2$, получим эллипсоид в области путь-дальность PCA-2:

$$h_{11} \cdot L^2 + 2h_{12} \cdot L \cdot R + h_{22} \cdot R^2 \leq \delta^2, \quad (6)$$

где $h_{11} \equiv (\mu_{22}^2 + \mu_{21}^2) / V_2^2$, $h_{22} \equiv \mu_{11}^2 + \mu_{12}^2$, $h_{12} \equiv h_{21} \equiv -(\mu_{11} \mu_{21} + \mu_{22} \mu_{12}) / V_2$;

$$\bar{M} \equiv (\mu_{ij}) \equiv (5) \equiv (\bar{\mu}_1 \quad \bar{\mu}_2).$$

За интервал путевого разрешения (м) принимаем малую полуось эллипсоида (6) в области путь-дальность, деленную на корень из 2 (дабы повороты спектра не нарушали теорему Котельникова):

$$\delta_x \approx \delta \cdot \left((h_{11} + h_{22}) + \left((h_{11} - h_{22})^2 + 4h_{12}^2 \right)^{1/2} \right)^{-1/2}. \quad (7)$$

4. Апостериорно уточним интервал синтеза T (с), ранее грубо оцененный по формуле (2).

Интервал должен быть таким, чтобы вариация частоты Доплера на нем относительно центра сцены, сложенная с доплеровской шириной луча, равнялась частоте $F_r = V_2 / \delta_x$ дискретизации сигнала по пути PCA-2 (частоте повторения PCA-1) для интервала путевого разрешения из формулы (7).

Интервал синтеза строим симметрично относительно нуля в радиально-скоростной области.

Верхнюю оценку доплеровской ширины луча PCA-2 получаем максимизацией по t (на интервале РЛ видимости) функции времени, выражаемой через градиент частоты Доплера в центре сцены при текущем положении носителей и радиус-вектор носителя PCA-2 относительно центра сцены:

$$\Delta \delta f_{\text{Ray}} \approx 2\lambda / D \cdot \max_t \{ |\bar{\nabla} \delta f(t)| \cdot X^{(2)}(t) / |\sin \langle \bar{\nabla} \delta f(t); \bar{X}^{(2)}(t) \rangle| \}, \quad (8)$$

где λ — длина волны, $D \times D$ — раскрыв антенны PCA-2.

Задаваясь в качестве нулевой итерации парой значений $t_0^{(\pm)} := \pm 0,5 \cdot T_0$, решаем (методом Ньютона) пару (для двух знаков \pm) уравнений относительно пары моментов времени $t^{(\pm)}$:

$$v_{\text{rad}}(\bar{0}; t^{(\pm)}) = \pm 0,5 \cdot (F_r - \Delta \delta f_{\text{Ray}}) \cdot c / f \equiv \pm 0,5 \cdot (V_2 / \delta_x - \Delta \delta f_{\text{Ray}}) \cdot \lambda. \quad (9)$$

По итогам решения (9), интервал синтеза: $[t^{(-)}, t^{(+)}]$, $t^{(-)} < 0$, $t^{(+)} > 0$, его длина (с): $T \approx t^{(+)} - t^{(-)}$, путевой размер ЦРГ: $N_x = \text{Pow}(2, [\log_2(T \cdot F_r)] + 1)$ (база добита до степени 2).

Частоту квантования АЦП по дальности выбираем $F_q := \max\{c/\delta_x, 1, 2 \cdot B\}$, тогда размер ЦРГ по дальности: $N_r = \text{Pow}(2, [\log_2(\max\{R(t^{(-)}), R(t^{(+)})\} \cdot F_q)] + 1)$ (база добита до степени 2).

5. Вычисляем кратности когерентного накопления полной голограммы по пути и по дальности.

Верхняя оценка глубины сцены по дальности {PCA-1 – \bar{y} – PCA-2} получается аналогично (8):

$$\Delta R_{\text{Ray}} \approx 2\lambda / D \cdot \max_t \{ |\bar{V}R(t)| \cdot X^{(2)}(t) / |\sin \langle \bar{V}R(t); \bar{X}^{(2)}(t) \rangle| \}. \quad (10)$$

С учетом (8), (10) кратности когерентного накопления голограммы по пути и дальности равны:

$$K_x = \text{Pow}(2, [\log_2(1 + F_r / \Delta \delta f_{\text{Ray}})] + 1),$$

$$K_r = \text{Pow}(2, [\max\{R(t^{(-)}), R(t^{(+)})\} / \Delta R_{\text{Ray}}] + 1).$$

Размеры когерентно-накопленной (свернутой в тор с самосуммированием) ЦРГ будут такими:

$$N_x = N_x / K_x, \quad N_r = N_r / K_r. \quad (11)$$

Свойства когерентного накопления изучены в статье [4]. В частности, при переходе в спектральную область когерентное накопление переходит в прореживание той же самой кратности [4].

Синтез РЛИ ведем по когерентно-накопленной ЦРГ размеров (11) по пути-дальности.

6. Вычисляем преобразования Лежандра закона миграции дальности (в виде отрезка ряда Тейлора по радиальной скорости) и его вариаций до второй степени по локальным координатам сцены.

Задачу решаем БПФ-методом с выходом в комплексную область значений скорости и времени.

Этап 1. Разложим в ряд Тейлора обратную к функции (4) функцию времени от централизованной радиальной скорости $t = t(\bar{y}; v_{\text{rad}})$; точку \bar{y} сцены считаем переменным параметром, которому последовательно придаем каждое из шести значений.

Решим относительно t уравнение $v_{\text{rad},m} = v_{\text{rad},0}(\bar{y}) + a_{\text{rad},0}(\bar{y}) \cdot t + o_2(\bar{y}, t)$ для каждой точки сцены из введенного «6-набора». В правой части уравнения $v_{\text{rad},0}(\bar{y})$, $a_{\text{rad},0}(\bar{y})$ — радиальные централизованные скорость и ускорение в момент $t = 0$, $o_2(\bar{y}, t)$ — сумма членов степени выше первой по времени формулы (4), в левой части — элемент мас-

сива $v_{\text{rad},m} \equiv 0,5V\omega_M^m \equiv 0,5V \exp(j2\pi m/M)$, $m=0, \dots, M-1$ размера $M = \text{Pow}(2, 11 \dots 12)$, скоростная константа $V \equiv \min\{v_{\text{rad}}(\bar{0}, t^{(\pm)})\}$.

Для решения указанного уравнения запустим итерационную процедуру со счетчиком i .

Нулевая итерация $i := 0$ — массив M комплексных чисел, считае-
мых формулой:

$$t_0(\bar{y}; m) := (0,5V\omega_M^m - v_{\text{rad},0}(\bar{y})) / a_{\text{rad},0}(\bar{y}).$$

Шаг процедуры $i := i+1$ пересчитывает массив M комплексных чисел по формуле:

$$t_{i+1}(\bar{y}; m) := t_i(\bar{y}; m) + t_0(\bar{y}; m) - o_2(\bar{y}, t_i(\bar{y}; m)) / a_{\text{rad},0}(\bar{y}). \quad (12)$$

Выходной массив (12) $\tau(\bar{y}; m) \equiv t_{i+1}(\bar{y}; m)$, $m=0, 1, \dots, M-1$; $|t_{i+1} - t_{ii}| \leq 2^{-13}$ подвергнем нешифтованному БПФ на базе M , выход БПФ нормируем: $\tau_{\text{FFT}}(\bar{y}; m) := \tau_{\text{FFT}}(\bar{y}; m) / \sqrt{M} \cdot (2/V)^m$, получая коэффициенты Тейлора искомой обратной функции; степень усекаем $M \approx \text{Pow}(2, 5 \dots 6)$:

$$t = t(\bar{y}; v_{\text{rad}}) \approx \sum_{m=0}^{M-1} \tau_{\text{FFT}}(\bar{y}; m) \cdot v_{\text{rad}}^m. \quad (13)$$

Этап 2. Разложим в ряд Тейлора по централизованной радиальной скорости преобразование Лежандра и его вариации по координатам сцены.

Преобразование Лежандра (LT — Legendre Transform) закона миграции (3) имеет вид [3, 5, 6]:

$$L(\bar{y}; v_{\text{rad}}) \equiv t(\bar{y}; v_{\text{rad}}) \cdot v_{\text{rad}} - R(\bar{y}; t(\bar{y}; v_{\text{rad}})), \text{ где } t(\bar{y}; v_{\text{rad}}) \text{ — разложе-}$$

ние из формулы (13).

Вычисляя LT в точках $v_{\text{rad},l} \equiv 0,5V\omega_L^l \equiv 0,5V \exp(j2\pi l/L)$, $l=0, \dots, L-1$, с использованием (9), получим массив $h(\bar{y}; l) \equiv L(\bar{y}; 0,5V\omega_L^l)$, $l=0, \dots, L-1$. Подвергнем его нешифтованному БПФ на базе $L \approx M$, выход БПФ нормируем: $h_{\text{FFT}}(\bar{y}; l) := h_{\text{FFT}}(\bar{y}; l) / \sqrt{L} \cdot (2/V)^l$, получая коэффициенты ряда Тейлора LT; степень усекаем: сверху $L \approx M$, снизу 2 — обеспечение подвижности отклика:

$$L(\bar{y}; v_{\text{rad}}) \approx \sum_{l=2}^{L-1} \{ h_{\text{FFT}}(\bar{y}; l) \approx c_0^{(l)} + c_1^{(l)} X + c_2^{(l)} Y + c_{11}^{(l)} X^2 + c_{12}^{(l)} XY + c_{22}^{(l)} Y^2 \} \cdot v_{\text{rad}}^l \quad (14)$$

Оценим для каждого l -коэффициента-функции ряда (14) коэффициенты-константы $c_i^{(l)}$, $c_{jk}^{(l)}$:

- а) $c_0^{(l)} \approx h_{\text{FFT}}(\bar{0}; l)$; $c_k^{(l)} \approx (h_{\text{FFT}}(\bar{y}_k; l) - c_0^{(l)}) / \varepsilon$;
- б) $c_{kk}^{(l)} \approx h_{\text{FFT}}(\bar{y}_{kk}; l) / E^2 - c_k^{(l)} / E - c_0^{(l)} / E^2 (k=1, 2)$;

в) $c_{12}^{(l)} \approx h_{\text{FFT}}(\bar{y}_{12}; l) / E^2 - (c_{11}^{(l)} + c_{22}^{(l)}) - (c_1^{(l)} + c_2^{(l)}) / E - c_0^{(l)} / E^2$ — в три шага (как описано).

7. Переведем преобразование Лежандра в спектральную область и получим наборы коэффициентов, определяющих фазу спектральной опоры синтеза и ее вариаций по сцене до второй степени.

Нормируем коэффициенты-константы (14) под переход из скоростного масштаба в масштаб номеров p, q отсчетов спектра и переход от баз дальности N_r и азимута N_x к базе K РЛИ сцены:

$$a_k^{(l)} := S_l \cdot c_k^{(l)}, \quad 0 \leq k \leq 2; \quad a_{ij}^{(l)} := S_l \cdot c_{ij}^{(l)}, \quad 1 \leq i, j \leq 2; \\ S_l \equiv \{def\} \equiv c^{l-1} \cdot KN_r^{l-1} / N_x^l \cdot F_r^l / F_q^{l-1}. \quad (15)$$

Несущую частоту f переведем в масштаб номеров дальностных отсчетов, координаты сцены переведем (с шагом (м) $s \leq \delta$) из (м) в масштаб номеров отсчетов РЛИ размера $K \approx \max\{N_x, N_r\}$:

$$Q := f \cdot N_q / F_q; \quad x := X / s, \quad y := Y / s. \quad (16)$$

8. Переведем закон обратного геокодирования из области время-дальность и области сдвигов по сцене в область безразмерных номеров отсчетов и по пути, и по дальности, и по массиву сцены.

Берем за основу формулу (5) и выполняем некоторые масштабирования на входе (13) и выходе:

$$(x(x, y) \quad r(x, y))^T \approx (\mu_{ij})(x \quad y)^T + \\ + x^2 \cdot (\eta_{11}^1 \quad \eta_{11}^2)^T + xy \cdot (\eta_{12}^1 \quad \eta_{12}^2)^T + y^2 \cdot (\eta_{22}^1 \quad \eta_{22}^2)^T. \quad (18)$$

Связь коэффициентов нормированной (18), исходной (5) формул IG такова:

$$\mu_{1k} \equiv \mu_{1k} / s \cdot F_r; \quad \eta_{ij}^1 \equiv \eta_{ij}^1 / s \cdot F_r; \quad \mu_{2k} \equiv \mu_{2k} / s \cdot F_q / c; \quad \eta_{ij}^2 \equiv \eta_{ij}^2 / s \cdot F_q / c \quad (19) \\ (1 \leq i, j, k \leq 2)$$

Закон IG (18) в лице констант (19) и выходных номеров отсчетов РЛИ (16) явно фигурирует в формуле интегрального оператора построения массива РЛИ по массиву спектра ЦРГ $F(p, q) \rightarrow I(x, y)$, приведенной ниже, а именно — в фазе первой Фурье-экспоненты (не в фазе опор):

$$I(x, y) \approx \iint dp dq \cdot F(p, q) \cdot \exp(j \cdot (2\pi / N_x \cdot p \cdot x(x, y) + 2\pi / N_r \cdot q \cdot r(x, y))) \times \\ \times \exp(j 2\pi / K \cdot \sum_{l=2}^{L-1} (a_0^{(l)} + a_1^{(l)} x + a_2^{(l)} y + a_{11}^{(l)} x^2 + a_{12}^{(l)} xy + a_{22}^{(l)} y^2) \cdot p^l / (Q + q)^{l-1}). \quad (20)$$

В фазе опор синтеза (вторая экспонента (20)) фигурируют константы и переменные из (15), (16).

Итак, все необходимые для синтеза РЛИ в горизонтальных координатах сцены массивы констант построены и фигурируют в формуле синтеза (20) — тем самым априорная обработка завершена.

Моделирование синтеза РЛИ в бистатистическом обзоре общего вида и его иллюстрирование

Дадим графические иллюстрации ряда промежуточных и конечных результатов при синтезе в самолетном бистатистическом обзоре общего вида алгоритмом [6], далеко обобщающим Omega-КА [2].

Рис. 2 в целом иллюстрирует, как GST искаженную координатную сетку (рис. 2, а) превращает в строго прямоугольную сетку с равными шагами по преобразованным координатам w, z в спектральной области: $w \equiv w_1(p, q)$, $z \equiv w_2(p, q)$, тем самым иллюстрируя правильность работы GST.

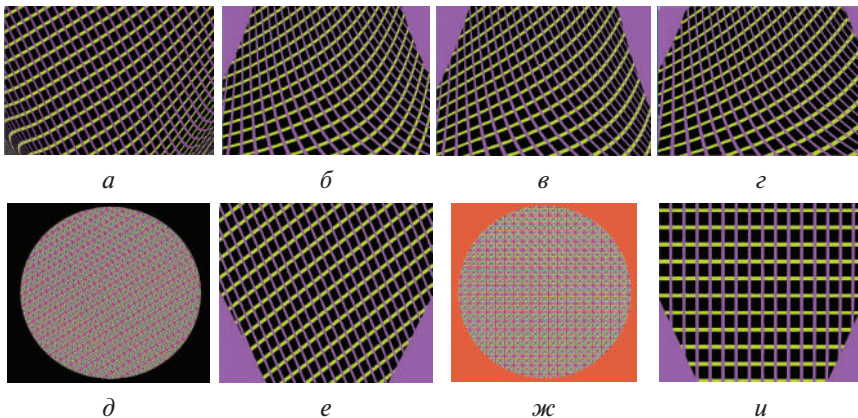


Рис. 2. Иллюстрация основных этапов работы обобщенного преобразования Столта (Generalized Stolt Transform — GST [5, 6])

Fig. 2 Illustration of the Generalized Stolt Transform (GST) main steps

Координаты w, z двойственны по Фурье отсчетам x, y сцены [6], и в них оператор (20) принимает вид Обратного преобразования Фурье от спектра ЦРГ с компенсированной центральной фазой: $f(p, q) \equiv F(p, q) \cdot \exp\left(j2\pi / K \cdot a_0^{(l)} \cdot p' / (Q + q)^{l-1}\right)$, если пренебречь вторыми степенями x, y .

На рис. 2, а — спектральная координатная сетка, задаваемая функциями $w_k(p, q) \equiv \left(2\pi / N_x \cdot \mu_{k1} \cdot p + 2\pi / N_r \cdot \mu_{k2} \cdot q\right) + 2\pi / K \cdot \sum_{l=2}^{L-1} a_k^{(l)} \cdot p' / (Q + q)^{l-1}$;

$k=1, 2$ — p, q -коэффициентами при координатных отсчетах x, y в первой степени в фазе полной экспоненты (20).

Рис. 2, б-г и е иллюстрируют подробно описанные в [5, 6] шаги 1–4 GST (одномерные масштабирования), приводящие исходную искривленную сетку (рис. 2, а) к аффинно-искаженной, но выпрямленной сетке (рис. 2, е). Это переход от исходных отсчетов p, q к спектральным координатам W, Z , двойственным по Фурье путевым координатам x, r .

Рис. 2, и иллюстрирует финальный шаг GST [6] — снятие аффинного искажения путем линейного преобразования $W, Z \rightarrow w, z$ к координатам, двойственным горизонтальным отсчетам сцены, задаваемого матрицей обратного геокодирования из линейного слагаемого формулы (5).

Рис. 2, д, ж — круговые вырезки спектра на этапах GST с рис. 2 е, и.

Итерационная процедура до-фокусировки [6] с целью компенсации вторых вариаций фазы опор здесь не иллюстрирована.

На рис. 3, а видно аффинное искажение картинки, на рис. 3, б оно отсутствует.

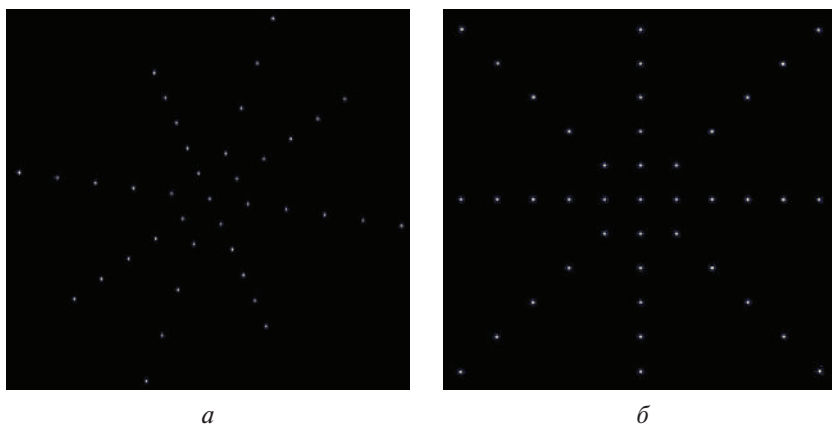


Рис. 3. Амплитудные РЛИ модели 41 точки, полученные в путевых координатах (а) и в горизонтальных координатах сцены (б)

Fig. 3. The amplitude radar image of 41 points models acquired in the waypoints (а) and the horizontal coordinate (б) of the stage

Рис. 3, а, б получены ОБПФ из вырезок спектра рис. 2, д, ж.

Параметры модели. РСА-1 и РСА-2 летят со скоростями 220 и 250 м/с под углом 75° на высотах 4 и 3 км, начальные положения — в точке пересечения горизонтальных проекций траекторий, сцена расположена под траекторией пассивного РСА-2 (в надире) на 7 км от начального положения РСА-2. Рабочий диапазон S , ширина полосы 1 ГГц. Рельефом пренебрегаем (равнина). Число целей — 41, 4 луча из ря-

дов целей под 45° между соседними лучами, шаг между целями 15 м.

(В моностатике рассмотренный здесь синтез РЛИ при угле скоса $\pm 90^\circ$ (надир) невозможен.)

Разрешение РЛИ. В путевых координатах — 18 см, в горизонтальных координатах — 27 см.

Заключение

Имитационное моделирование синтеза в бистатических обзорах выявило особенности, резко контрастирующие с моностатикой: например, возможность синтезировать РЛИ целей, находящихся под траекторией носителя пассивного РСА-2, то есть при угле скоса $\pm 90^\circ$, а также целей в надире.

Также выявлена сильная зависимость разрешающей способности бистатической пары от положения цели на поверхности Земли и наличие на Земле вырожденных точек и кривых, в окрестности которых синтез проблематичен даже при боковой геометрии обзора.

Алгоритм синтеза [6], ранее разработанный для моностатики и космоса, доказал пригодность для получения в бистатическом самолетном обзоре общего вида РЛИ высокого разрешения и качества для невырожденных сцен, не выходящих за пределы видимости на расчетном интервале синтеза.

Выявлена типичность эквивалентно-сильно-скошенного обзора (со скосом $\sim 30\text{--}45^\circ$). Однако, поскольку РЛИ строим в горизонтальных прямоугольных координатах по вырезанному из спектра круглому куску должного размера, а интервал синтеза взят с должным запасом, не происходит характерных для сильно скошенных обзоров искажения координатной сетки или деформации отклика.

Выявлена невозможность полноценной адаптации алгоритмов CSA и SPECAN к бистатике.

Литература/References

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба [и др.]. М. : Радиотехника, 2010.

Verba V. S., Neronskij L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. *Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* [Space-borne Earth Surveillance Radar Systems]. Radiotekhnika, 2010. (In Russian)

2. Mittermayer J., Moreira A., Loffeld O. High Precision Processing of Spotlight SAR Data Using the Extended Chirp Scaling Algorithm. *EU-SAR'98*, pp. 561–564, Friedrichshafen, Germany, May, 1998.

3. Cumming I. G., Wong F. H. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. Algorithms and Implementation*. ArtechHouse, Boston & London, 1992.

4. Лиханский С. Г. Модифицированный метод скользящего окна как способ компенсации стробэффекта и одновременно повышения

производительности сверточных алгоритмов синтеза в прожекторном режиме // Наукоемкие технологии. 2006. № 10.

Lihanskij S. G. Modificirovannyj metod skol'zyashchego okna kak sposob kompensacii strobeffekta i odnovremenno povysheniya proizvoditel'nosti svertochnyh algoritmov sinteza v prozhektornom rezhime [Modified sliding window method as the way of stroboscopic-effect compensation and simultaneously improvement productivity of convolution synthesizing algorithms in Spotlight Mode]. *Naukoemkie tekhnologii*, 2006, № 10. (In Russian)

5. Лиханский С. Г. Модифицированный алгоритм Omega-KA синтеза радиолокационных изображений повышенной точности в прожекторном режиме в космических РСА и его баллистическое обеспечение // Труды международной конференции по научно-техническим проблемам землеобзора, дозора и управления и комплексов с беспилотными летательными аппаратами. М.: ОАО «Концерн «Вега», 2013.

Lihanskij S. G. Modificirovannyj algoritm Omega-KA sinteza radiolokacionnyh izobra-zhenij povyshennoj tochnosti v prozhektornom rezhime v kosmicheskikh RSA i ego ballisticheskoe obespechenie [Modified algorithm Omega-KA for high-precision radar image synthesizing in Spotlight Mode in space-based SAR and it's ballistic support]. *Trudy mezhdunarodnoj konferencii po nauchno-tekhnicheskim problemam zemleobzora, dozora i upravleniya i kompleksov s bespilotnymi le-tatel'nyimi apparatami* [The Proceedings of the International Conference devoted to scientific and technical problems of Earth Surveillance, patrol and control of complexes of pilotless flying apparatuses]. Moscow, Koncern "Vega", 2013. (In Russian)

6. Лиханский С. Г. Синтез геокодированного изображения высокого разрешения с учетом полного набора искажающих факторов в прожекторном режиме в РСА воздушного и космического базирования // Труды юбилейной научно-технической конференции ОАО «Концерн «Вега». М., 2014.

Lihanskij S. G. Sintez geokodirovaniya izobrazheniya vysokogo razresheniya s uchetom polnogo nabora iskazhayushchikh faktorov v prozhektornom rezhime RSA vozdušnogo i kos-micheskogo bazirovaniya [High-resolution image geocoding synthesis with full set of distorting factors in the search mode of space-based and airborne SAR]. *Trudy yubileynoy nauchno-teknicheskoy konfrentsii*. Moscow, Koncern "Vega", 2014. (In Russian)

Информация об авторах

Алексеев Санал Баатрович — инженер второй категории АО «Концерн «Вега». Контакты: Alex90_sb@mail.ru. Москва, Россия.

Лиханский Сергей Германович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Концерн «Вега». Контакты: tatonika@inbox.ru. Москва, Россия.

Тарасенко Анна Максимовна — ведущий инженер АО «Концерн «Вега». Контакты: asianna@list.ru. Москва, Россия.

Information about authors

Alekseev Sanal Baatrovich — Engineer, Joint-Stock Corporation “Vega”.
E-mail: Alex90_sb@mail.ru. Moscow, Russia.

Likhansky Sergey Germanovich — Ph. D. in Engineering Science, Senior Research Scientist, Joint-Stock Corporation “Vega”. E-mail: tatonika@inbox.ru. Moscow, Russia.

Tarassenko Anna Maksimovna — Senior Research Scientist, Joint-Stock Corporation “Vega”. E-mail: asianna@list.ru. Moscow, Russia.

Поступила / Receiver: 03.09.2018

Принята в печать / Accepted: 14.10.2018